

SIMULASI SISTEM *ELECTRONIC DIFFERENTIAL* SEBAGAI PENGATUR MOTOR INDUKSI PADA MOBIL LISTRIK MENGGUNAKAN TEKNIK *FIELD ORIENTED CONTROL*

***Simulation System Of Electronic Differential Induction Motor Control
As On Electric Cars Using The Field Oriented Control***

Muhamad Majedi¹, I Nyoman Wahyu Satiawan², I Made Mara³

ABSTRAK

Penggunaan gearbox (differential mekanik) untuk stabilisasi roda kendaraan masih memiliki kekurangan yaitu perlunya perawatan secara rutin dan penyaluran torsi putar dari motor induksi ke roda tidak maksimal dikarenakan masih terdapat banyak losses pada gear. Untuk memaksimalkan penyaluran torsi pada mobil listrik, kita membutuhkan suatu sistem untuk mengatur kecepatan motor penggerak roda kendaraan listrik secara elektronik.

Penelitian ini membuat simulasi sistem electronic differential yang dikendalikan dengan teknik scalar control (V/F) dan teknik field oriented control dengan menggunakan software Simulink MATLAB version 7.8.0.(R2009a). Dari hasil simulasi dan pengujian, sistem electronic differential mampu bekerja seperti halnya differential secara mekanik, hal ini ditunjukkan saat kendaraan melaju di jalan yang lurus sistem electronic differential mampu memberikan referensi kecepatan yang sama dan referensi kecepatan yang berbeda pada kedua motor penggerak roda saat kendaraan sedang berbelok.

Penggunaan teknik field oriented control pada electronic differential memberikan performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan teknik scalar control (V/F), hal ini ditunjukkan dengan menghasilkan waktu steady state yang lebih cepat dan ripple torsi yang lebih kecil.

Kata Kunci : *Electronic Differential, Filed Oriented Control, Scalar Control (V/F), Mobil Listrik*

ABSTRAC

The use of gearbox (mechanic differential) to stabilize the wheels in the vehicles has some weaknesses. Gearbox need to be maintained and the distribution of torque from the induction motor to the wheel is not maximum because of any losses on the gear. To maximize the torque distribution in an electric car, it needs an electronic system to manage the speed of activator motor's wheel.

This research developed a differential electronic model and verified in computer simulation using Simulink MATLAB version 7.8.0 (R2009a). Both scalar control (V/F) and field oriented control were applied in the model. The simulation result shows that the electronic differential system works well just like a mechanic differential.

The system is able to control the wheels properly, i.e have the same speed in the straight road and have different speed when it turned right or left. In both control methods applied reveal that the Field Oriented Control (FOC) gives better performance than the scalar control (V/F) particularly in reaching the steady state condition and give smaller torque ripple.

Keywords: *Electronic Differential, Field Oriented Control, Scalar Control (V/F), Electric Car.*

PENDAHULUAN

Penggunaan motor listrik sebagai penggerak memiliki beberapa keuntungan diantaranya, tidak menimbulkan polusi, biaya operasional yang rendah dan pemeliharaan mudah. Disamping itu penggunaan motor listrik memungkinkan pengaturan kecepatan dan stabilisasi kendaraan dapat diatur secara elektronik, sehingga didapatkan hasil pengaturan yang lebih nyaman dan handal. Awalnya, motor arus searah (DC) banyak

banyak digunakan sebagai penggerak mobil listrik karena sistem kontrol motor DC relatif lebih sederhana dan murah dibandingkan motor arus bolak-balik (AC). Tetapi motor DC memiliki beberapa kelemahan diantaranya struktur motor DC lebih berat (20% sampai 40%) dibandingkan dengan motor arus bolak-balik (AC) untuk daya yang sama (Warsito, 2006), biaya pemeliharaan yang lebih tinggi karena adanya sikat / komutator, harga satuan

¹Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia

Jln.Majapahit No.62 Mataram 83125 Telepon (0370)636755, 636126-Ext. 117 Fax (0370)636523

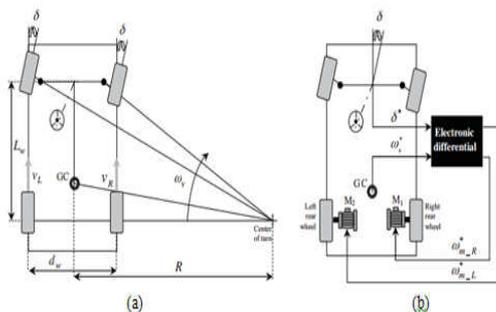
Email:

masih mahal, dan keterbatasan jumlah phase motor dimana hanya tersedia motor dengan satu phase saja, sehingga untuk daya yang besar, masih terkendala dengan rating komponen yang digunakan untuk pengaturan kecepatannya.

Penggunaan gearbox untuk stabilisasi roda kendaraan masih memiliki kekurangan yaitu perlunya perawatan secara rutin dan penyaluran torsi putar dari motor induksi ke roda tidak maksimal dikarenakan masih terdapat banyak losses pada gear. Oleh karena itu, untuk memaksimalkan penyaluran torsi pada mobil listrik, kita membutuhkan suatu sistem untuk mengatur kecepatan motor penggerak roda kendaraan listrik secara elektronik. *Electronic differential* adalah suatu cara yang mampu mengatasi permasalahan diatas. *Electronic differential* ini menggunakan dua motor sebagai penggerak sehingga dapat berguna untuk memberi masukan kecepatan yang sesuai pada masing-masing penggerak agar mobil listrik dapat bergerak sesuai dengan keinginan.

Diferensial elektronik yang berarti pemisah secara elektronik adalah alat yang akan digunakan untuk membedakan kecepatan antara dua roda penggerak pada mobil listrik (hal ini sangat diperlukan ketika mobil berbelok). Diferensial elektronik menjadi mungkin untuk direalisasikan karena sumber penggerak berupa motor listrik yang dapat di kendalikan secara elektronik.

Sistem *electronic differential* menggunakan sudut kemudi (δ) dan pedal gas (ω_V) sebagai parameter input:



Gambar 1 (a) Struktur Diferensial Elektronik. (b) Model untuk Struktur Kendaraan.(Hartani,2009)

Gambar 1 menunjukkan bahwa kecepatan linier dari setiap roda penggerak dinyatakan sebagai fungsi dari kecepatan kendaraan dan jari-jari kurva yang dinyatakan dalam persamaan berikut ini: (Hartani,2009)

$$V_L = \omega_V \left(R + \frac{d_w}{2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$V_R = \omega_V \left(R - \frac{d_w}{2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

- V_L = Kecepatan linier roda kiri (m/s)
- ω_V = Pedal gas referensi (rad/s)
- R = Jari-jari belokan (m)
- d_w = Jarak antara as roda kiri dengan as roda kanan (m)

Jari-jari belokan tergantung pada jarak roda dan sudut kemudi seperti ditunjukkan dalam persamaan berikut :

$$R = \frac{L_w}{\tan \delta} \dots \dots \dots (3)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (1) dan (2) diperoleh kecepatan angular dari setiap roda penggerak seperti pada persamaan berikut :

$$\omega_{r_L} = \frac{L_w + \frac{1}{2} d_w \cdot \tan \delta}{L_w} \dots \dots \dots (4)$$

$$\omega_{r_R} = \frac{L_w - \frac{1}{2} d_w \cdot \tan \delta}{L_w} \omega_V \dots \dots \dots (5)$$

Perbedaan kecepatan angular dari roda penggerak dinyatakan dalam persamaan di bawah ini.

$$\Delta \omega = \omega_{r_L} - \omega_{r_R} = \frac{d_w \cdot \tan \delta}{L_w} \dots \dots \dots (6)$$

Penetapan sudut kemudi ditunjukkan pada persamaan berikut :

- $\delta > 0 \rightarrow$ belok kanan
- $\delta = 0 \rightarrow$ lurus
- $\delta < 0 \rightarrow$ belok kiri

Pengendalian kecepatan angular roda penggerak mengikuti persamaan di bawah ini

$$\omega_{r_L}^* = \omega_V + \frac{\Delta \omega}{2} \dots \dots \dots (7)$$

$$\omega_{r_R}^* = \omega_V - \frac{\Delta \omega}{2} \dots \dots \dots (8)$$

Kecepatan referensi dari kedua motor mengikuti persamaan sebagai berikut:

$$\omega_{m_L}^* = k_{gear} \cdot \omega_{r_L}^* \dots \dots \dots (9)$$

$$\omega_{m_R}^* = k_{gear} \cdot \omega_{r_R}^* \dots \dots \dots (10)$$

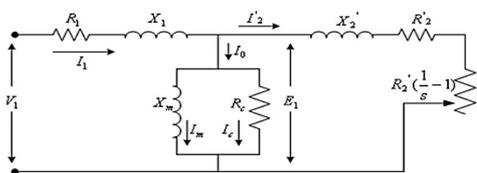
Motor induksi adalah suatu mesin listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi gerak menggunakan gandengan magnetik dan mempunyai slip antara medan stator dan medan rotor. Motor induksi merupakan motor yang paling umum digunakan pada berbagai peralatan industri. Karena rancangannya yang sederhana, murah dan mudah didapat, dan dapat langsung disambungkan ke sumber daya AC.



Gambar 2 Konstruksi motor induksi 3 phase (Petruzella, 2010)

Prinsip kerja dari motor induksi tiga phase bahwa pada saat berputar ($S < 1$) nilai tegangan induksi rotor (E_{2s}) dan reaktansi kumparan rotor (X_2) juga dipengaruhi oleh slip, maka selanjutnya nilai arus rotor (I_2) saat rotor sudah berputar akan dapat dihitung dengan cara membagi tegangan induksi rotor dengan impedansi kumparan rotor.

Berdasarkan prinsip transformasi nilai parameter sisi sekunder ke sisi primer transformator ($R_2' = a^2 R_2$, $X_2' =$ dengan $a = N_1/N_2$), maka rangkaian ekuivalen motor induksi dapat dibuat.



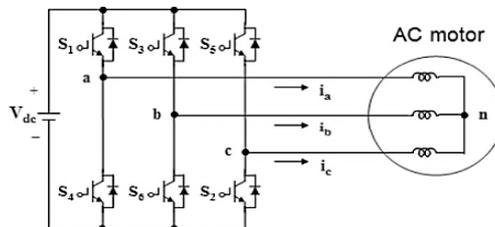
Gambar 3 Rangkaian ekuivalen motor induksi tiga phase (Theraja, 1993)

Berdasarkan rangkaian ekuivalen motor induksi pada Gambar 2.11, maka dapat diperoleh persamaan arus rotor dipandang dari sisi stator:

$$I_2' = \frac{V_1}{\left(R_1 + a^2 \left(\frac{R_2}{S} \right) \right) + j(X_1 + a^2 X_2)} \dots \dots \dots (11)$$

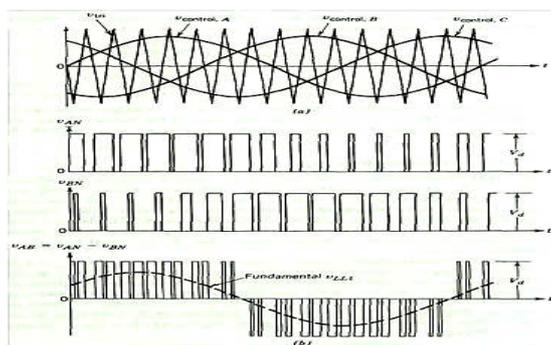
Inverter. Inverter adalah rangkaian konverter dari DC ke AC, yang mempunyai fungsi mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC simetris dengan besar dan frekuensi yang diinginkan. Tegangan keluaran bisa tetap ataupun berubah-ubah, dengan frekuensi tetap ataupun dengan

frekuensi yang berubah-ubah. Tegangan keluaran variabel didapat dengan mengubah-ubah tegangan input DC dan agar inverter konstan.



Gambar 4 rangkaian inverter 3 phase (Ahmed, 2013)

PWM inverter. Adalah alat yang digunakan untuk mengubah atau mengkonversi tegangan masukan searah menjadi tegangan keluaran bolak balik dengan besar tegangan dan frekuensi tertentu dengan menggunakan teknik modulasi lebar pulsa. Terdapat macam bentuk pulsa yang dapat digunakan untuk modulasi.



Gambar 5 proses sinusoidal inverter (Ahmed, 2013)

Sinusoidal Pulse Width Modulation. (SPWM) adalah suatu metode yang digunakan untuk menentukan sudut pemucuan dengan cara membandingkan gelombang segitiga dengan 3 gelombang sinus (phase R, phase S, dan phase T) yang masing-masing berbeda phase 120°

Perbandingan modulasi amplitudo didefinisikan sebagai:

$$m_a = \frac{v_{control}}{v_{tri}} \dots \dots \dots (12)$$

m_a = Modulasi amplitudo

$v_{control}$ = Amplitudo puncak dari sinyal kontrol
 v_{tri} = Sinyal gelombang segitiga

Sedangkan untuk nilai perbandingan modulasi frekuensi didefinisikan sebagai:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \dots \dots \dots (13)$$

Fungsi alih kontroler *PI* (dalam domain *s*) dapat dinyatakan sebagai berikut:

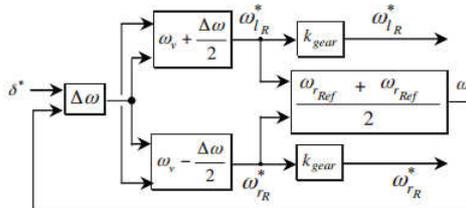
$$u(s) = \left[K_p + \frac{K_i}{s} \right] e(s) \dots \dots \dots (16)$$

Dimana:

- $u(t)$ = Sinyal keluaran control *PI*
- K_p = Konstanta proporsional
- K_i = Konstanta integral
- $e(t)$ = Sinyal *error*

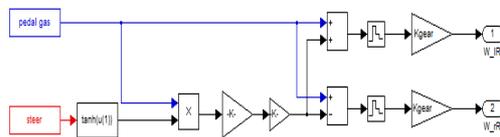
METODE PENELITIAN

Perancangan dan pemodelan sistem Blok diagram dari diferensial elektronik seperti pada gambar 8. terdapat dua masukan yaitu sudut kemudi (*steering angle*) dan pedal gas (*accelerator*) dan keluaran yang dihasilkan adalah masukan yang digunakan untuk kecepatan referensi untuk roda penggerak kanan dan roda penggerak kiri.



Gambar 8 Blok Diagram Diferensial Elektronik (Hartani, 2009)

Dan dapat dibuat blok simulasi dalam MATI AR seperti terlihat pada gambar 3.5



Gambar 9 Blok Simulasi Diferensial Elektronik (Afkal, 2009)

Dengan:

- ω_v = Pedal gas (*accelerator*)
- d = Sudut kemudi (*steering angle*)
- ω_{lR} = Referensi kecepatan untuk roda penggerak kiri
- ω_{rR} = Referensi kecepatan untuk roda penggerak kanan

Parameter yang digunakan dalam menyimulasikan sistem diferensial elektronik dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 Parameter kendaraan listrik (Hartani,2009)

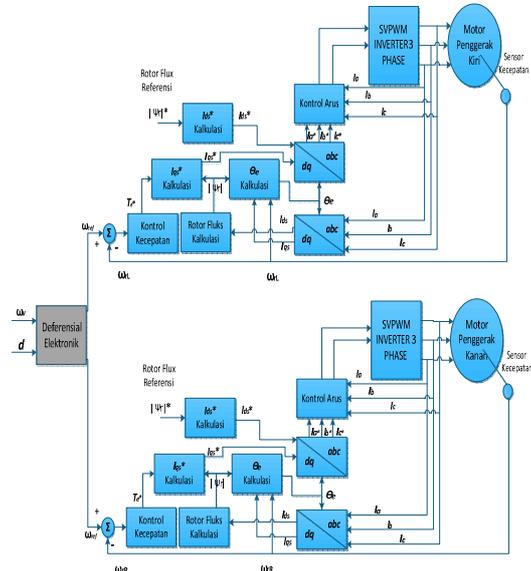
No.	Parameter	Nilai
1	Jarak antara as roda kiri dengan as roda kanan (m)	1,5
2	Jarak antara roda depan dengan roda belakang (m)	2,5
3	Rasio Gearbox (rasio)	7,2

Adapun parameter motor induksi yang digunakan pada perancangan dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 Parameter Motor Induksi (Singh,dkk,2015)

No.	Parameter	Nilai
1	Daya motor (KW)	3.7
2	Tegangan motor line to line (Volt)	460
3	Frekuensi (Hz)	50
4	Jumlah pasang kutub	2
5	Tahanan stator (Ohm)	0.087
6	Induktansi stator (mH)	0.8
7	Tahanan rotor (Ohm)	0.228
8	Induktansi rotor (mH)	0.8
9	Induktansi magnetik (mH)	34.7
10	Momen inersia (kg.m ²)	1.662

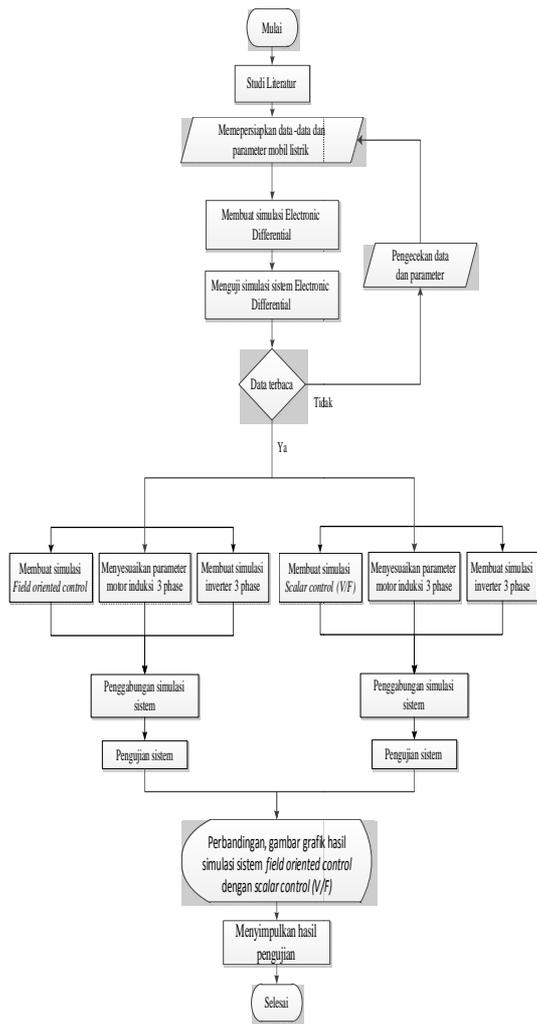
Blok diagram dari perancangan keseluruhan sistem dimana pada perancangan blok diagram ini menggunakan dua input yaitu pedal gas (*accelerator*) dan sudut kemudi (*steering angle*), dimana keluaran dari diferensial elektronik akan dijadikan kecepatan referensi (ω_{ref}) untuk menggerakkan motor penggerak dan motor penggerak ini digunakan untuk menggerakkan roda depan pada kendaraan roda empat atau lebih. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 blok diagram perancangan sistem *Field Oriented Control*

Kecepatan yang di hasilkan motor penggerak akan di kalkulasi ulang (*feedback*) untuk mendapatkan kecepatan yang lebih baik atau stabil

Diagram alir simulasi sistem *electronic differential* menggunakan teknik *field oriented control*

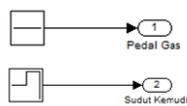


Gambar 11 Diagram alir sistem *electronic differential* menggunakan teknik *field oriented control*

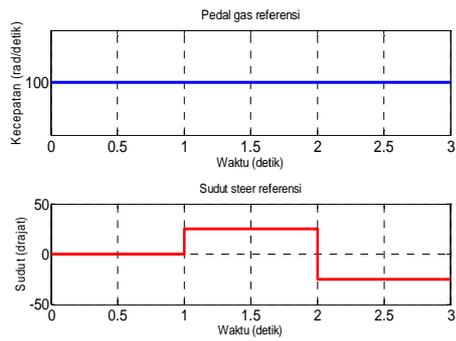
HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Sistem Diferensial Elektronik.

Dalam simulasi diferensial elektronik dengan menggunakan teknik *scalar control (V/F)* dan teknik *field oriented control*, sinyal masukan yang digunakan adalah pedal gas (*accelerator*) dan sudut kemudi (*steering angle*). Adapun hasil rancangan diferensial elektronik pada Simulink MATLAB ditunjukkan pada Gambar 9. Blok diagram sinyal masukan seperti pada Gambar 12, sedangkan sinyal masukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.

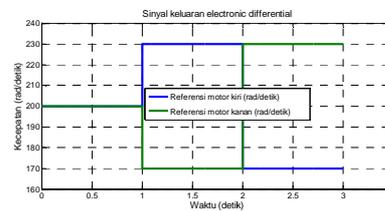


Gambar 12 Blok diagram sinyal masukan diferensial elektronik



Gambar 13 Sinyal masukan diferensial elektronik

Dari masukan yang diberikan akan dihasilkan sinyal keluaran kecepatan referensi untuk kedua roda pada Gambar 14.



Gambar 14 Sinyal kecepatan referensi dari diferensial elektronik

Hasil Simulasi Diferensial Elektronik Menggunakan Metode *Scalar Control (V/F)* Pada Motor Induksi Tiga Phase.

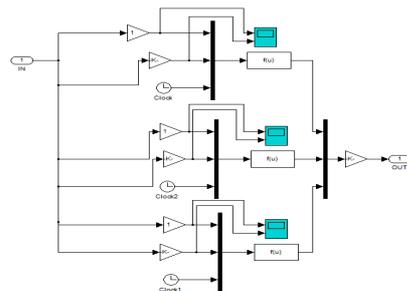
Masukkan yang digunakan pada metode *scalar control (V/F)* adalah kecepatan referensi yang dihasilkan diferensial elektronik. Kecepatan referensi sebagai masukan blok modulator yang merubah sinyal kotak (step) menjadi sinyal sinusoidal, hal ini dilakukan dengan cara menerapkan rumus:

$$y = A \sin 2\pi ft \dots \dots \dots (17)$$

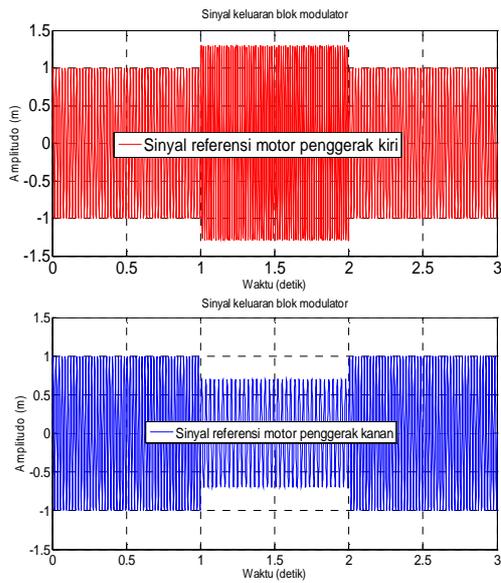
Keterangan:

- A = Amplitudo (m)
- f = Frekuensi (Hz)
- t = waktu (detik)

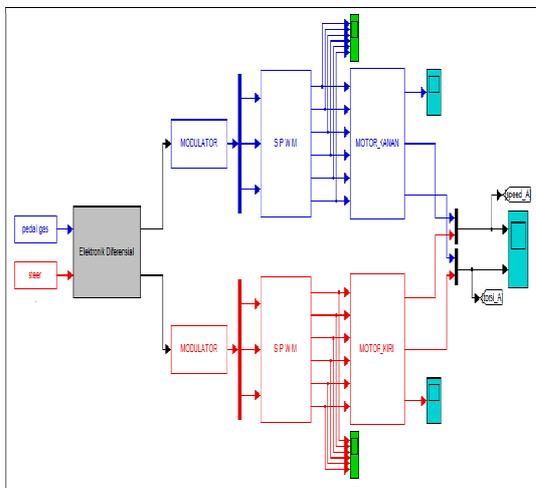
Blok diagram modulator ditunjukkan pada Gambar 15, sedangkan sinyal keluaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 15 Blok diagram modulator

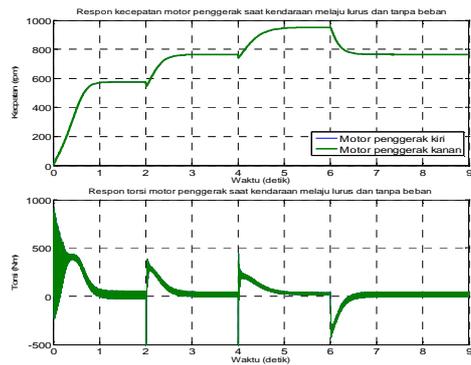


Gambar 16 Sinyal keluaran blok modulator gelombang sinus inilah yang digunakan sebagai masukan SPWM inverter untuk bisa membangkitkan sumber tegangan tiga fase yang digunakan untuk menggerakkan motor induksi tiga phase,

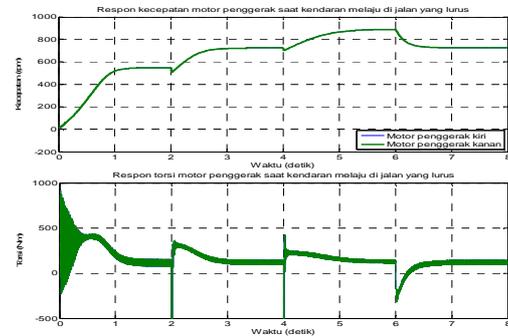


Gambar 17 Blok diagram diferensial elektronik menggunakan metode *Scalar Control (V/F)*

Hasil simulasi dalam keadaan tanpa beban dan berbeban dilakukan pengujian dengan memberikan nilai pedal gas referensi 60 rad/detik saat $t = 0$ detik sampai $t = 2$ detik, 80 rad/detik saat $t = 2$ detik sampai $t = 4$ detik, 100 rad/detik saat $t = 4$ detik sampai $t = 6$ detik dan 80 rad/detik saat $t = 6$ detik sampai $t = 8$ detik, nilai sudut kemudi 0° mulai dari $t = 0$ detik sampai $t = 8$ detik. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 18.

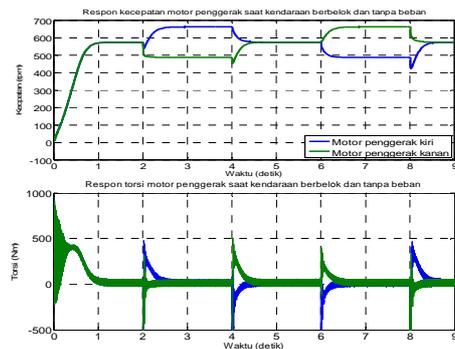


Gambar 18 Respon kecepatan dan torsi motor dengan pedal gas referensi yang berubah-ubah, tanpa beban



Gambar 20 respon kecepatan dengan pedal gas referensi yang berubah-ubah, berbeban

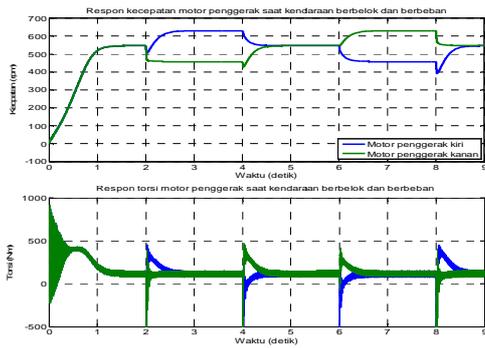
Pengujian sistem dalam keadaan berbelok, tanpa beban dan berbeban



Gambar 20 respon kecepatan dan torsi saat kendaraan berbelok ke kanan dan ke kiri dengan sudut belok 25° , tanpa beban

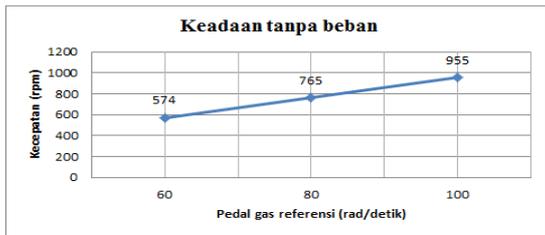
Hasil pengujian sistem, baik dalam keadaan tanpa beban atau berbeban, dengan semakin bertambahnya pedal gas referensi maka kecepatan motor induksi yang digunakan untuk menggerakkan roda kendaraan listrik akan semakin cepat.

Hal ini mengacu pada persamaan (5) dan persamaan (6).

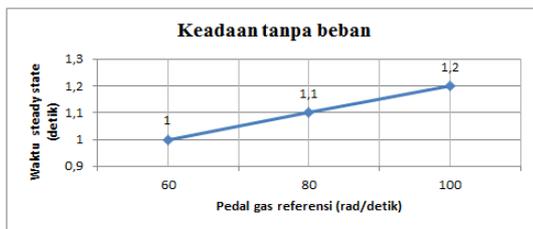


Gambar 21 respon kecepatan dan torsi saat kendaraan berbelok ke kanan dan ke kiri dengan sudut belok 25°, berbeban

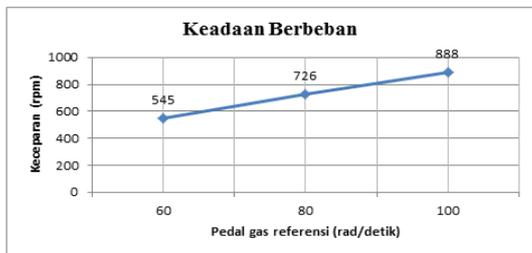
Perubahan pedal gas referensi tidak hanya berpengaruh pada kecepatan dan steady state. Hal ini berlaku pada sistem dalam keadaan tanpa beban dan dalam keadaan berbeban.



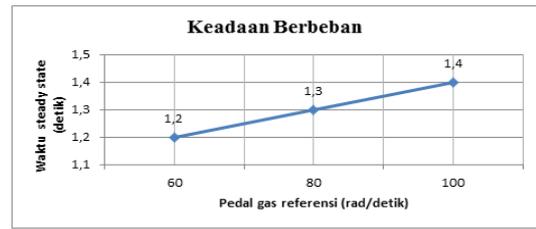
Gambar 22 Grafik perubahan pedal gas referensi terhadap kecepatan motor induksi



Gambar 23 Grafik perubahan pedal gas referensi terhadap waktu steady state

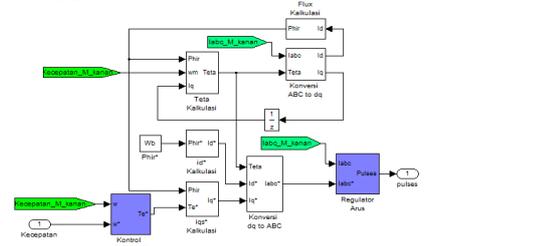


Gambar 24 Grafik perubahan pedal gas referensi terhadap kecepatan motor induksi

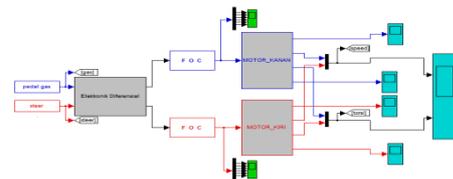


Gambar 25 Grafik perubahan pedal gas referensi terhadap kecepatan motor induksi

Hasil Simulasi Diferensial Elektronik Menggunakan Metode *Field Oriented Control* Pada Motor Induksi. Masukan yang digunakan sama dengan yang digunakan pada sistem electronic differential yang menggunakan teknik scalar control.

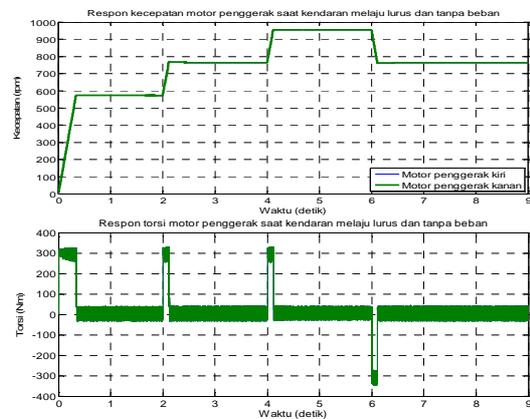


Gambar 26 Blok simulasi field oriented control

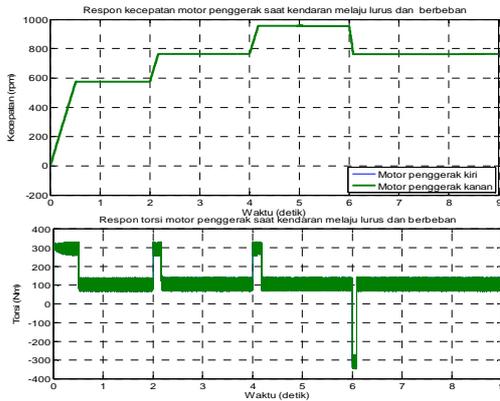


Gambar 27 Blok diagram diferensial elektronik menggunakan metode *Field Oriented Control*

Pengujian sistem dalam keadaan tanpa beban dan berbeban.

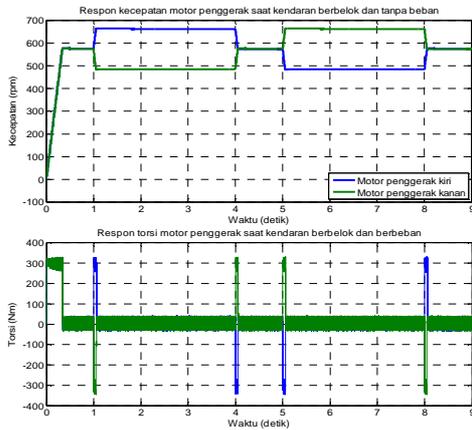


Gambar 28 Respon kecepatan dan torsi dengan pedal gas referensi yang berubah-ubah, tanpa beban

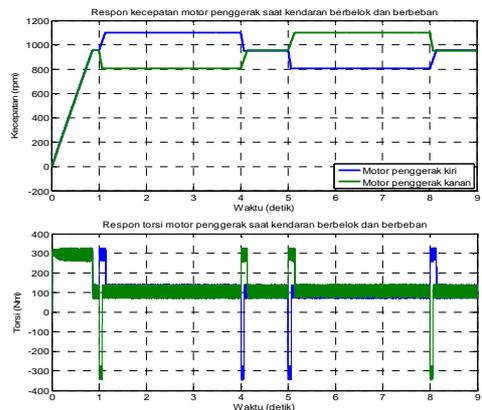


Gambar 29 Respon kecepatan dan torsi dengan pedal gas referensi yang berubah-ubah, berbeban

Pengujian sistem dalam keadaan berbelok.



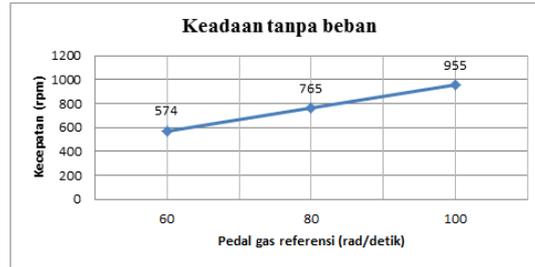
Gambar 30 respon kecepatan dan torsi saat kendaraan berbelok ke kanan dan ke kiri dengan sudut belok 25°, tanpa beban



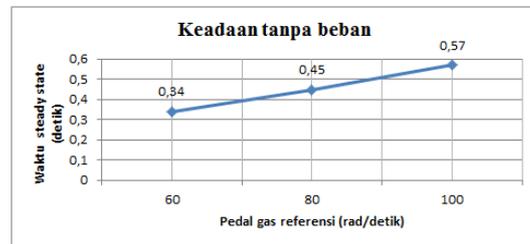
Gambar 31 respon kecepatan dan torsi saat kendaraan berbelok ke kanan dan ke kiri dengan sudut belok 25°, berbeban

Perubahan respon kecepatan pada sistem dipengaruhi oleh perubahan referensi pedal gas yang diberikan, baik dalam keadaan tanpa beban atau berbeban.

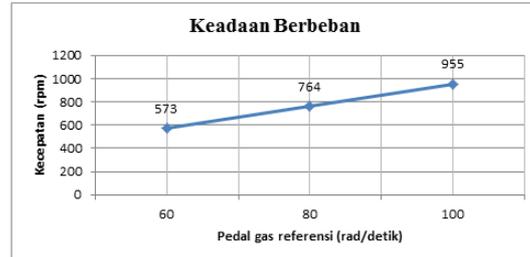
Pembebanan yang diberikan sebesar 100 Nm menyebabkan perubahan pada kecepatan dan waktu yang dibutuhkan untuk steady state.



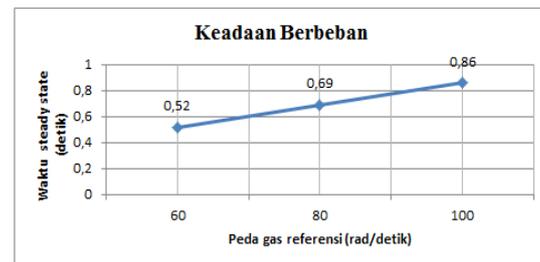
Gambar 32 Grafik perubahan pedal gas referensi terhadap kecepatan motor induksi



Gambar 33 Grafik perubahan pedal gas referensi terhadap waktu steady state



Gambar 34 Grafik perubahan pedal gas referensi terhadap kecepatan motor induksi



Gambar 35 Grafik perubahan pedal gas referensi terhadap waktu steady state

Perbandingan pengujian sistem electronic differential menggunakan metode scalar control (V/F) dengan metode field oriented control. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3 Perbandingan metode scalar control dengan metode field oriented control

NO	Metode					
	Scalar Control (V/F)			Field Oriented Control (FOC)		
	Pedal gas referensi (rad/detik)	Waktu steady state (detik)		Pedal gas referensi (rad/detik)	Waktu steady state (detik)	
		Kondisi jalan lurus dan berbelok			Kondisi jalan lurus dan berbelok	
Tanpa beban		Berbeban	Tanpa beban		Berbeban	
1	60	1	1,2	60	0,34	0,52
2	80	1,1	1,3	80	0,45	0,69
3	100	1,2	1,4	100	0,57	0,86

KESIMPULAN

1. Dari hasil simulasi, dapat dilihat sistem diferensial elektronik yang sudah dirancang bisa bekerja seperti halnya diferensial mekanik (gardan) pada kendaraan roda empat atau lebih, yaitu mampu menghasilkan kecepatan yang sama untuk motor penggerak roda kanan dan roda kiri ketika kendaraan bergerak di jalan/trek yang lurus dan mampu membedakan kecepatan untuk kedua motor penggerak di saat kendaraan akan berbelok ke kiri maupun berbelok ke kanan, baik dengan menerapkan metode *field oriented control* dan metode *scalar control* (V/F).
2. Penggunaan *controller* PI pada teknik *field oriented control* (FOC) sebagai kontrol kecepatan mampu memberikan performa yang lebih baik dari pada teknik *scalar control* (V/F), ditunjukkan pada penggunaan metode *field oriented control* mampu menghasilkan respon kecepatan dan respon torsi yang lebih stabil, menghasilkan waktu *steady state* yang lebih cepat untuk nilai pedal gas referensi yang sama. Saat pedal gas 60, 80, dan 100 rad/detik dan dalam keadaan tanpa beban, untuk metode *scalar control* (V/F) masing-masing menghasilkan waktu *steady state* 1 detik, 1,1 detik, dan 1,2 detik sedangkan metode *field oriented control* 0.34 detik, 0.45 detik, dan 0,57 detik.
3. Pada kondisi berbeban teknik *field oriented control* (FOC) juga menunjukkan performa respon yang lebih baik dari teknik *scalar control* (V/F), menghasilkan *steady state* yang lebih cepat yaitu saat $t = 0,69$ detik sedangkan teknik *scalar control* (V/F) mencapai *steady state* saat $t = 1.1$ detik untuk semua nilai pedal gas referensi dan nilai torsi beban yang sama, menghasilkan respon kecepatan yang lebih stabil serta mampu membangkitkan torsi pada motor

sesuai dengan nilai torsi beban yang diberikan.

4. Metode *field oriented control* juga menghasilkan nilai presentasi ripple torsi yang lebih kecil dibandingkan dengan metode *scalar control*, masing-masing nilainya adalah 57,1% dan 67,2%.

SARAN

1. Membandingkan sistem diferensial elektronik yang menggunakan metode *field oriented control* (FOC) dengan metode pengaturan kecepatan motor yang lain seperti metode *direct torque control* (DTC)
2. Merealisasikan sistem diferensial elektronik dan kemudian melakukan pengujian secara aktual untuk berbagai kondisi kecepatan dan sudut belok yang berbeda-beda

DAFTAR PUSTAKA

- Afkal, M.I.A., 2009, "Perancangan Dan Simulasi *Direct Torque Fuzzy Control* Untuk Motor Induksi Tiga-Phase Sebagai Penggerak Roda Kendaraan Listrik", Jurusan Teknik Elektronika, Politeknik Elektronika Surabaya, Surabaya.
- Ahmed, W, A, H., 2103, "Power electronic inverter circuit", Faculty of Enginnering, University of Khartoum.
- Fauzi, R., Happiyanto, C, D., dan Sulistijono, A, I., 2014, "Pengembangan PI controller sebagai kendali respon cepat pada motor induksi tiga phase berbasis indirect field oriented control", Teknik Mekanisasi Pengolahan, Politeknik Palu.
- Ferdiansyah, D. S., 2008, " Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Phase dengan Kontrol PID melalui Metode *Field Oriented Control* (FOC)", Jurusan Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya.
- Haddoun, A., Benbouzid, M.E.H., Diallo, D., Abdessemed, R., Ghouili, J., dan Srairi, K., 2010, "Design and Implementation of an Electric Differential for Traction Application", University of Brest, France.
- Hartani, K., Bourahla, M., Miloud, Y., dan Sekour, M., 2009, " Electronic Differential with Direct Torque Fuzzy Control for Vehicle Propulsion System",

- Electrotechnic Department, University center of Saida, Algeria.
- Heisler, H., 2002, " *Vehicle Technology* ", College of North West London, London.
- Krishnan, R., 2001, " *Electric Motor Drives Analisis, modeling and Control* ", prentice hall, United States of America.
- Kumar, V., dan Rao, S., 2011, " *Modified Direct Torque Control of Three-Phase Induction Motor Drives with Low Ripple in Flux and Torque* ", National Institute of Technology, Warangal, A.P., India.
- Nugroho, G., Sukmadi,T., dan Handoko,S., 2012, " *Perbandingan Sistem Pengendalian Motor Induksi Tiga Phase Dengan Metode Field Oriented Control Menggunakan PI Controller Dan Fuzzy Logic Controller* " Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Petruzella, F, D.,2010, " *Electric motor and control system* ", Higher Education, New York, America.
- Purba, J., 2009, " *Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Phase dengan Direct Torque Control dengan Menggunakan MATLAB 7.1.0* ", Jurusan Teknik Elektro Universitas Sumatra Utara, Medan
- Purwanto, G., Prabowo, G., Wahyono, E., dan Rifadil, M.M., 2011, " *Pengembangan Model Motor Induksi sebagai Penggerak Mobil Listrik dengan Menggunakan Metode Vektor Kontrol* ", Jurusan Teknik Elektronika, Politeknik Elektronika Surabaya, Surabaya.
- Sardiyanto., 2001, " *Pembuatan Modul Inverter 3 Phase Sinusoidal Pulse Width Modulation Sebagai Pengatur Kecepatan Motor Induksi Tiga Phase Terhubung Segitiga 220 Volt* ", Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang.
- Sharifian,M, B, B., Babaei, E., dan Eslami, A., 2001, " *Comparison of Two Torque Control Methods For Induction Motor* ", Faculty of Electrical and Computer Enginnering, Tabriz University, Iran.
- Singh, D, K., Manikpuri, S., and Sharma, M, D., 2015, " *Design and Simulation of an Efficient Neural Network Based Speed Controller For Vector Controlled Induction Motor Drive* ", Raman Institute of Science and Technology Kota Bilaspur, India.
- Singh, S., Pandey., A, K., dan, Dipraj, 2012, " *Design of PI Controller to Minimize the Speed Error of D.C. Servo Motor* ", Buddha Institute of Technology, India
- Sutawinaya, I.P., 2013, " *Pengembangan Model Fuzzy Mamdani Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Phase Berbasis Metode Kontrol Field Oriented* ", Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bali, Bali.
- Theraja, B, K., dan Theraja, A, K., (1993), " *Electrical Technology* ", S.chand.
- Zhao, J., Yan, Y., Li, B., Liu, X., dan Chen, Z., (2014), " *Influence of Different Rotor Teeth Shapes on the Performance of Flux Switching Permanent Magnet Machines Used for Electric Vehicles* ", School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing , China.